Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol.**22, 2** 135-162 (2017)

MODELADO DE DISIPADORES HISTERÉTICOS DE ENERGÍA EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO. DIFERENCIAS ENTRE ANÁLISIS EN EL PLANO Y EN TRES DIMENSIONES

Horacio de Jesús Nangullasmú Hernández
Candidato Doctoral, Posgrado en Ingeniería Estructural
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200, Ciudad de México
e-mail: hnangu@hotmail.com

Arturo Tena Colunga
Profesor, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
Edificio P4, 3er Piso, Av. San Pablo # 180, 02200 Ciudad de México
Correo electrónico: atc@correo.azc.uam.mx.

RESUMEN

Se evalúan los resultados obtenidos entre dos programas de análisis estructural, a partir de análisis estáticos no lineales y dinámicos paso a paso, con el objetivo de evaluar el efecto de ortogonalidad en el modelado de marcos de concreto reforzado con disipadores histeréticos de energía apoyados en contraventeo chevrón. Se estudiaron marcos planos y modelos en tres dimensiones con el principal objetivo de comparar sus resultados. Éstos se valoran a partir de curvas de capacidad, mapeos de fluencias inelásticas, periodos de vibrar y ciclos de histéresis de los disipadores utilizados. Finalmente, se presentan comentarios acerca del modelado riguroso en tres dimensiones y del impacto de la rigidez del nudo viga-columna en la rigidez global de la estructura.

Palabras clave: disipadores de energía, fusibles estructurales, estructuras de concreto reforzado, análisis estáticos no lineales, análisis dinámicos paso a paso

MODELLING OF HYSTERETIC ENERGY DISSIPATION DEVICES IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. DIFFERENCES BETWEEN 2D AND 3D ANALYSES

ABSTRACT

Results obtained from pushover and nonlinear time-history analyses are compared in order to evaluate orthogonality effects in reinforced concrete frames with hysteretic energy dissipation devices. Plane and three-dimensional frames were modeled using two different software. Their results were evaluated from capacity pushover curves, inelastic demands mappings, fundamental periods and hysteresis

Recibido: Octubre de 2016
Aceptado: Enero de 2017

loops of the dissipation devices. Finally, comments are presented about rigorous modeling in three dimensions related to the importance of the stiffness in the beam-column joint.

Keywords: energy dissipation devices, structural fuses, reinforced concrete structures, pushover analysis, time-history analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Los ingenieros y académicos utilizan modelos matemáticos para representar las características de interés de una estructura en cuestión y de esta manera establecen los parámetros necesarios para su análisis y diseño. Con el avance tecnológico y computacional, dichos modelos matemáticos tienden a ser más complejos, debido a la incorporación de nuevos algoritmos que simulan el comportamiento de distintos tipos de materiales o elementos estructurales.

Se han realizado diversos estudios para el modelado de estructuras con disipadores histeréticos de energía; sin embargo, éstos se limitan a modelos planos de uno o múltiples grados de libertad. Por ejemplo, se han evaluado formulaciones para el modelado numérico de elementos ADAS, basados en la variación de la sección transversal del disipador con idealizaciones geométricas, y se han comparado con resultados experimentales obteniendo buena correlación entre ellos (Whittaker *et al.* 1989, Tena-Colunga 1997). No obstante, existen otras propuestas sencillas, como las basadas en discretizar a los disipadores por medio de dovelas, donde cada una de ellas tiene longitud constante pero ancho variable (Aguiar *et al.* 2016).

Otros estudios proponen metodologías de diseño basadas en desempeño, para sistemas equivalentes de un grado de libertad aplicables a sistemas de múltiples grados de libertad. Dentro de éstos se puede citar el trabajo publicado por Ruiz y Badillo (2001), donde evalúan edificios reforzados con disipadores de energía; o bien, la investigación llevada a cabo por Chen y colaboradores para el diseño sísmico de pilas de puentes estructuradas con marcos de acero y contravientos restringidos contra pandeo. En estos estudios se modela al sistema disipador con un comportamiento bilineal y se hace uso de análisis dinámicos paso a paso, ya sea para determinar las distorsiones de entrepiso y la ductilidad máxima de los disipadores en el sistema equivalente de un grado de libertad (Ruiz y Badillo 2001), o bien para validar la exactitud del procedimiento de diseño (Chen *et al.* 2007).

Con el interés de evaluar la eficiencia de nuevas configuraciones o de nuevos materiales para los disipadores por histéresis, se han realizado investigaciones que constan tanto de pruebas experimentales como de estudios paramétricos; éstos últimos, con el objetivo de comprobar la eficacia de dichas propuestas. A modo de ejemplo, existen estudios donde se proponen nuevas conexiones en forma de ángulo para elementos de madera usados en edificaciones europeas de pequeña a mediana altura. Estas conexiones se comportan bajo el mismo principio que los disipadores ADAS y analíticamente se representaron con elementos tipo liga no lineales definidos acorde al modelo multilineal de Sivaselvan y Reinhorn (Latour y Rizzano 2015). También se puede

mencionar el estudio llevado a cabo para crear disipadores con forma de reloj de arena con el uso de cobre C11000, que es dúctil, de baja fluencia, y altamente resistente a la corrosión (De la Llera *et al.* 2004). A partir de ensayes experimentales de siete pares de disipadores, se identificaron los parámetros que controlan su comportamiento cíclico y se propuso un modelo simplificado dependientes de su relación de aspecto y de su ductilidad. Este modelo propuesto se usó para modelar a los disipadores de cobre (definidos por una única deformación transversal), en marcos planos de concreto reforzado de 6, 12 y 25 niveles con tres diferentes configuraciones estructurales (De la Llera *et al.* 2004).

La calibración matemática entre resultados de marcos planos con dispositivos ADAS, obtenidos a partir de programas de investigación y comerciales de análisis estructural no es un tema nuevo. Dentro de este ámbito, se encuentra la comparativa hecha por Chalco (2014) con elementos finitos elaborados en MATLAB y evaluados con dos ejemplos elaborados en el programa SAP2000. Chalco establece una idealización con elementos finitos para el dispositivo ADAS con elementos de liga para representar su comportamiento histerético bilineal. Cada propiedad del elemento ADAS idealizado se puede atribuir a un solo desplazamiento interno, es decir, su deformación no afecta al comportamiento de otros desplazamientos internos. Por tal motivo, se aprecian diferencias en la comparación de las respuestas estructurales mientras se utilizan un mayor número de dispositivos ADAS y propone que se obtendría una mejor correlación de los resultados si se hubiese modelado a los disipadores con base en el modelo Bouc-Wen.

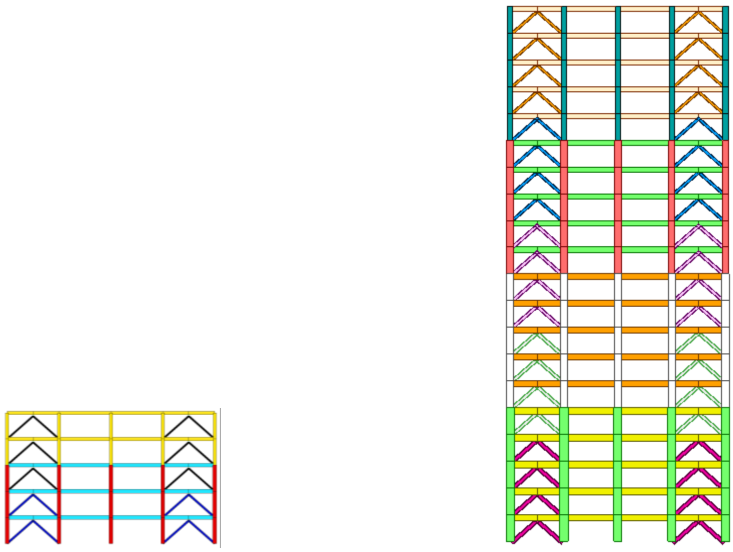
En trabajos previos de los autores (Tena y Nangullasmú 2013; Nangullasmú y Tena 2015), se evaluó el comportamiento de marcos planos con disipadores de energía a partir de una metodología basada en balances de rigidez. Estos resultados se obtuvieron de análisis estáticos no lineales efectuados en el programa DRAIN 2DX (Prakash *et al.* 1992), modelando a los disipadores como elementos viga-columna. Los resultados de dicho programa son altamente confiables y se han calibrado en un sinnúmero de investigaciones anteriores a ésta, pero cuenta con varias limitantes, entre ellas la ausencia de interfaces gráficas y el realizar los análisis en dos dimensiones. Además, para visualizar el desempeño de los marcos paralelos al del objeto en estudio, se tienen que hacer uso de otras técnicas de modelado. Con el objetivo de realizar modelos más complejos en 3D, que tomen en cuenta efectos ortogonales, se comparan los resultados de una serie de modelos realizados en DRAIN 2DX con el programa MIDAS Gen. Estos resultados se obtuvieron a partir de análisis estáticos no lineales y de dinámicos paso a paso.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS EVALUADOS

2.1 Configuración geométrica

Se analizaron marcos planos, marcos planos acoplados y modelos tridimensionales de concreto reforzado con disipadores de energía soportados mediante un sistema de contraventeo de acero tipo chevrón. La configuración geométrica de los modelos en estudio corresponde a edificios regulares; se analizaron modelos de cinco y 20 niveles de marcos planos formados por cuatro

crujías de 800 cm de claro, alturas de entrepiso de 400 cm y ángulo de inclinación de contravientos θ=45° (Figura 1). Los modelos de marcos planos acoplados tienen la misma geometría que los marcos planos anteriormente descritos; se modelaron cuatro marcos en la dirección "*x*" con cuatro crujías (Figura 2) y cinco en la dirección "*y*" con tres crujías (Figura 3), acoplándolos mediante vigas enlace axial e infinitamente rígidas para cada dirección en estudio, y de esta manera visualizar el efecto de los marcos paralelos en cuestión para compararlo con los resultados obtenidos del modelo tridimensional de cinco niveles (Figura 4).



a) Modelo de cinco niveles b) Modelo de 20 niveles

Figura 1 Modelo de marcos planos

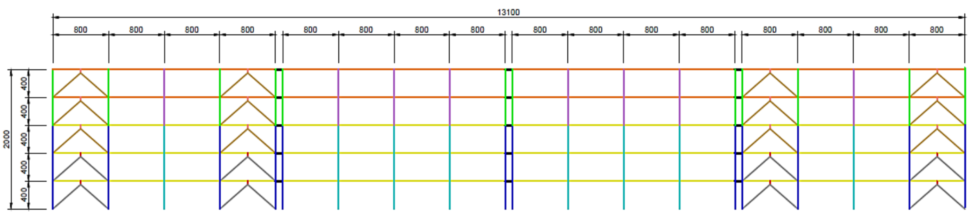


Figura 2 Modelo de marcos acoplados dirección "*x*"

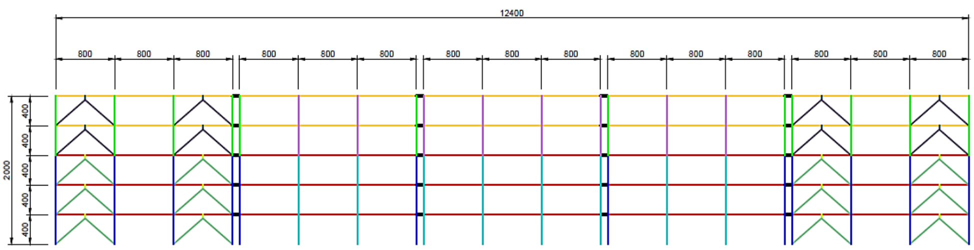


Figura 3 Modelo de marcos acoplados dirección "*y*" (dimensiones en cm)

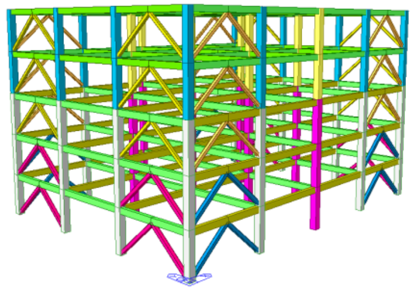


Figura 4 Modelo tridimensional

Los cambios de colores en las Figuras 1 a 4 representan esquemáticamente los cambios de secciones transversales conforme aumenta la altura de los modelos, es decir, los colores comunes en uno y otro modelo no corresponden a una misma sección (por ejemplo, las vigas amarillas del modelo de cinco niveles son distintas a las vigas amarillas del modelo de 20 niveles). En ninguno de los modelos existe cambio de secciones de vigas, columnas y contravientos en el mismo nivel de entrepiso, con el objetivo de mitigar el efecto de piso suave por el cambio abrupto de rigidez y resistencia.

2.2 Configuración y modelado estructural

Para la comparación de resultados, usando dos programas distintos de análisis estructural, se modelaron a los elementos estructurales siguiendo la misma hipótesis de comportamiento para cada sistema estructural. Los elementos de contraventeo se modelaron para que trabajasen exclusivamente en dirección axial. Vigas y columnas se modelaron tomando en cuenta efectos de rigidez para tensión/compresión, cortantes y momentos flexionantes.

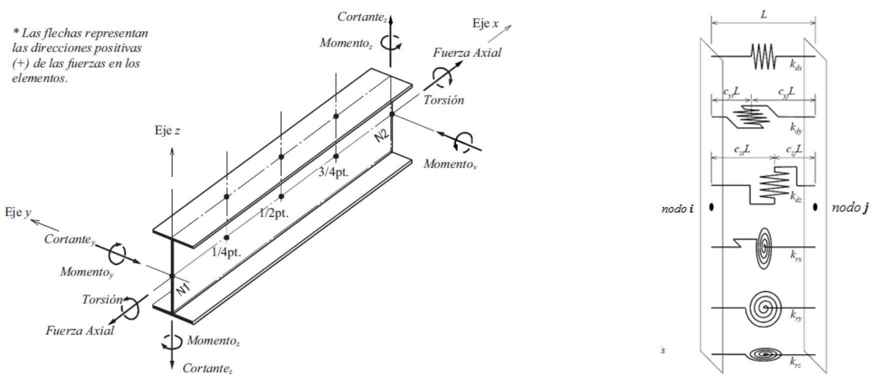
El modelado de los disipadores de energía se puede hacer de diversas maneras dependiendo del programa de análisis no lineal utilizado y de los elementos disponibles en sus librerías (Tena 2000). Conforme los programas de análisis estructural han ido evolucionando, dichos elementos disponibles se han ampliado con el paso del tiempo. Por ejemplo, era común a principios de los años noventa modelar los disipadores de manera simplificada con elementos axiales equivalentes, modelado que para un montado en contraventeo chevrón es razonable, ya que los elementos equivalentes trabajan en la misma dirección que lo hacen los dispositivos, aunque se obtienen imprecisiones debido a la interacción artificial que se establece entre los nudos superiores de los marcos de cada entrepiso con los disipadores, lo que en realidad no sucede al estar los disipadores conectados exclusivamente en la parte intermedia de las vigas (Tena 2000).

Después, al desarrollarse elementos tipo liga (“link”) de cero longitud que se discretizan en un nodo, éstos se han utilizado para modelar disipadores de energía (por ejemplo, Christopoulos y Filiatrault 2006). La ventaja es su sencillez de aplicación. La desventaja en un montado con contravientos chevrón es que no modela la longitud real de los disipadores, generalmente se consideran que sólo trabajan a cortante (se desprecia la flexión y la carga axial, o si se consideran, están totalmente desacopladas por ser modelados por medio de resortes), y no se

considera la rotación que puede experimentar éstos en su apoyo inferior con el sistema de contravientos, que modifica el ángulo real de inclinación de éstos (que ya se ha demostrado impactan a la respuesta real del marco) y, por ello, se tienen imprecisiones que no han sido cuantificadas ni reportadas aún en los elementos mecánicos de los contravientos y de las vigas que se conectan directamente con los disipadores.

Siempre ha existido la posibilidad de modelar con mayor rigor a los disipadores (Tena 2000), utilizando elementos tipo viga-columna (“beam-column”) que permiten considerar su longitud, ubicación y condiciones de continuidad “reales”, así como considerar que pueden trabajar a cortante, flexión y axialmente al mismo tiempo. El esfuerzo adicional para hacerlo no es muy grande, es incluir los nodos extras requeridos para modelar con precisión la geometría del disipador, y los resultados que se obtienen correlacionan muy bien con los que se han reportado en experimentos que se han hecho en mesa vibradora (Tena-Colunga 1997). Sin embargo, es un hecho que la popularidad de los elementos tipo liga para modelar disipadores ha aumentado en años recientes.

Así, en este estudio los disipadores de energía se modelaron en el programa DRAIN 2DX como elementos tipo viga-columna, mientras que en MIDAS Gen (Midas 2014) se modelaron de dos maneras distintas. La primera de ellas, como elementos tipo viga-columna y su formulación está basada en la teoría de vigas de Timoshenko (Figura 5a). La segunda, como elementos tipo liga, los cuáles son resortes que individualmente representan una deformación axial, dos deformaciones por cortante, una deformación por torsión y dos deformaciones por flexión (Figura 5b). Dependiendo del método de aplicación del análisis, puede ser del tipo elemento o del tipo fuerza. Los elementos de liga del tipo elemento reflejan directamente el comportamiento no lineal del elemento restableciendo la matriz de rigidez (análisis estáticos no lineales). Cuando se utilizan los elementos de liga del tipo fuerza (análisis dinámicos paso a paso), éstos reflejan la no linealidad de manera indirecta convirtiendo las fuerzas de los elementos, calculadas a partir de las propiedades no lineales, a fuerzas externas (Midas 2014).



a) Elementos tipo viga-columna b) Elementos tipo liga

Figura 5 Modelado de elementos estructurales en MIDAS Gen (adaptado de Midas 2014)

Otra diferencia importante del modelado entre los programas utilizados radica en el punto de inserción geométrico de las vigas. Mientras que en DRAIN-2DX este punto de inserción viene definido de manera predeterminada y se puede

ajustar con la ubicación de las zonas rígidas de los extremos de las columnas, en MIDAS Gen se puede elegir directamente entre insertar la viga en el centroide geométrico de la sección o en el punto superior medio para alinearlo con la altura del entrepiso. Por este motivo y como primera instancia, se evaluaron cinco versiones del modelo de marco plano de cinco niveles a partir de los resultados de análisis estáticos no lineales. Cuatro de estas versiones se modelaron en MIDAS Gen en función de dos parámetros; el primero, la forma de modelar el disipador (elementos viga-columna o elementos de tipo liga); la segunda, la variación del punto de inserción de las vigas. Para todos los modelos las condiciones de apoyo para las columnas del primer nivel son empotradas y se agregó una condición de frontera a giro en el extremo inferior de todos los disipadores.

La finalidad de la evaluación de los marcos planos de cinco niveles fue valorar la divergencia de resultados relacionados al modelado entre ambos programas. En los marcos planos de 20 niveles se aprecian las diferencias en el modelado del disipador para los dos tipos de análisis efectuados en este trabajo (estático no lineal y dinámico paso a paso). Finalmente, y con base en la comparativa de los resultados de marcos planos, se evalúa el impacto de la rigidez del nudo viga-columna en la rigidez global a partir de las diferencias observadas entre los marcos planos acoplados y el modelo tridimensional llevados a cabo en DRAIN-2DX y MIDAS Gen respectivamente.

Las siglas utilizadas para los modelos hacen referencia al número de niveles usados (M5), al tipo de elemento usado para los disipadores (B para elementos viga-columna y L para elementos de tipo liga), y al punto de inserción de las vigas en el modelo (C para el centroide y T para la parte superior de la sección transversal). A manera de ejemplo, el modelo M5BC representa al marco de cinco niveles, con disipadores modelados con elementos viga-columna y las vigas colocadas en el centroide de la sección transversal.

Los modelos evaluados en el presente trabajo se diseñaron con base en relaciones de rigidez entre el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador (α) y entre el contraviento y el disipador (β). Además de cuidar que se cumplieran los balances de rigidez antes mencionados, se revisaron que todos los elementos cumplieran con las demandas de resistencia impuestas en el proceso de prediseño (Tena y Nangullasmú 2013). Los elementos de concreto reforzado se diseñaron acorde a los requisitos de marcos no dúctiles de las Normas Técnicas Complementarias (NTCC-04), añadiendo al proceso de diseño los requisitos de confinamiento dúctil referidas a las secciones 7.2.3 y 7.3.4, relacionadas principalmente a la separación de estribos en vigas y columnas respectivamente.

Se presenta en la Tabla 1 las secciones utilizadas para cada uno de los sistemas involucrados para los modelos de marcos planos acoplados de cinco niveles y para el modelo tridimensional. Los balances de rigidez indican que el sistema del marco es más flexible que el sistema estructural global (α=0.25), y que el disipador tiene la mitad de rigidez que el contraviento (β=0.50). De manera esquemática, en la Figura 6 se aprecian los armados longitudinales y transversales de las secciones de concreto. El diámetro de los estribos utilizados se distinguen con colores diferentes; rojo, para estribos No. 2.5 (diámetro de 5/16" o 7.9 mm); azul, para estribos No. 3 (diámetro de 3/8" o 9.5 mm); verde, para estribos No. 4 (diámetro de 1/2" o 12.7 mm).

Se aprecian de la tabla y figura antes mencionadas, que para vigas y columnas las secciones transversales variaron conforme a la altura de los modelos. Además, se decidió hacer diferencias en el armado longitudinal para las vigas acorde a la dirección de análisis, y en las columnas se reforzaron en mayor medida aquéllas dónde se descargaba la componente axial de los contravientos. Como se aprecia de las Figuras 2 y 3, la rigidez de los marcos de concreto es diferente para cada dirección de análisis, debido al número de crujías que presentan cada uno. Por tal motivo, se decidió controlar los balances de rigidez a partir del espesor de los contravientos de acero utilizados y de la rigidez elástica de los disipadores, para poder satisfacer de manera práctica los balances "α" y "β" propuestos.

Tabla 1 Modelo de 5 niveles, α=0.25, β=0.50 (unidades: t-cm)

	Entrepiso	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
Vigas	V1x 1-3	35	55	6 Vs No.6	4 Vs No. 6	4 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
	V2x 4-5	30	50	5 Vs No.6	4 Vs No. 6	3 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
	V1y 1-3	35	55	7Vs No.6 + 4Vs No.5	6Vs No.6 + 2Vs No.5	4 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
	V2y 4-5	30	50	6Vs No.6 + 5Vs No.5	6Vs No.6 + 2Vs No.5	4 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
	Entrepiso	**b**	**h**	**Refuerzo Long.**	**Cuantía**	**Est. Extremo**	**Est. Centro**
Columna	C1 Ext 1-3	60	60	48 Vs No. 6	3.80%	7 No. 3 @ 10	7 No. 3 @ 15
	C2 Ext 4-5	55	55	40 Vs No. 6	3.77%	6 No. 3 @ 10	6 No. 3 @ 15
	C1 Int 1-3	60	60	20 Vs No. 6	1.58%	4 No. 3 @ 8	4 No. 3 @ 15
	C2 Int 4-5	55	55	16 Vs No. 6	1.51%	3 No. 4 @ 10	3 No. 4 @ 15
	Entrepiso	**b**	**h**	**t**			
Contraviento	CV1x 1-2	30.48	30.48	1.91			
	CV2x 3-5	25.4	25.4	1.91			
	CV1y 1-2	30.48	30.48	1.59			
	CV2y 3-5	25.4	25.4	1.27			
	Entrepiso	**F_y**	**K_2**	**$K_{ELÁSTICA}$**			
Disipador	D1x 1-2	65.41	0.05	251.34			
	D2x 3-5	51.77	0.05	206.66			
	D1y 1-2	65.41	0.05	211.78			
	D2y 3-5	51.77	0.05	141.50			

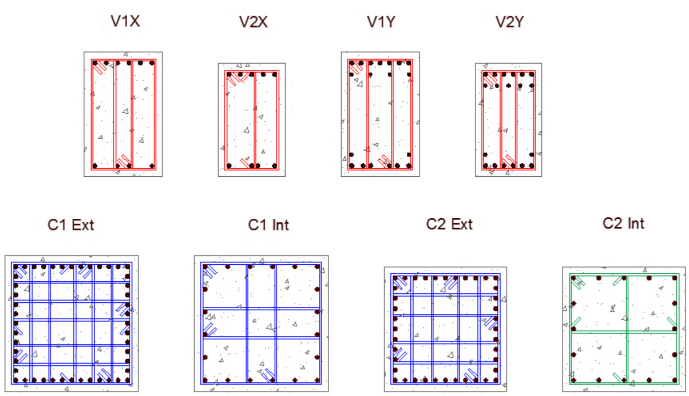


Figura 6 Armado de vigas y columnas para el modelo de 5 niveles con α=0.25, β=0.50

2.3 Diferencias en la introducción de datos

El programa MIDAS Gen cuenta con dos modalidades para la introducción de los diagramas momento-rotación y de los diagramas de interacción, ambos indispensables para los análisis estáticos no lineales. El primero de ellos, es la forma automática a partir del armado propuesto por el usuario en las secciones de concreto utilizadas. La segunda es introduciendo de manera manual los datos para crear los diagramas antes mencionados, uno por cada tipo de sección a considerar. En la Figura 7 se presentan los diagramas momento-rotación obtenidos a partir del cálculo automático en MIDAS Gen (línea continua) y los calculados de manera externa. Se aprecia de ésta, que MIDAS Gen no cuenta aún con una herramienta necesaria para el cálculo de los diagramas que tome en cuenta el confinamiento del concreto, causado por la separación de los estribos.

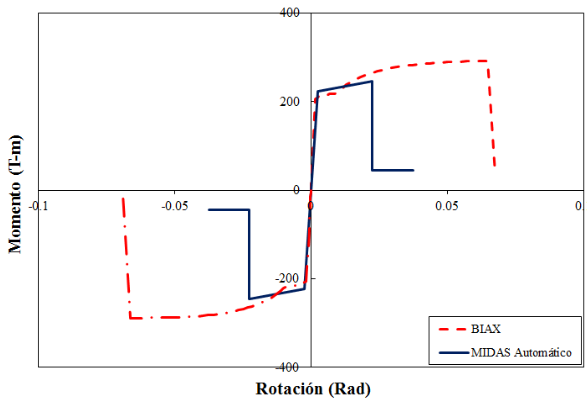


Figura 7 Diagrama momento-rotación para vigas

Para cada una de los modelos antes mencionados, se introdujeron de manera manual los datos de los diagramas momento-curvatura y de los diagramas de interacción calculados previamente con el programa BIAX (Wallace y Moehle 1989), con el objetivo de considerar el confinamiento del concreto reforzado y obtener una mejor correlación entre los resultados de ambos programas. La manera de introducir los parámetros requeridos para el análisis es sustancialmente diferente para cada uno de los programas utilizados; mientras DRAIN-2DX requiere de un formato de texto, MIDAS Gen cuenta con una interfaz gráfica la cual permite una visualización previa de los datos introducidos.

Para los diagramas de momento-rotación se realizó una idealización bilineal (Figura 8), asegurando que la cantidad de energía entre el diagrama obtenido por el programa BIAX fuera equivalente al del idealizado. Ambos programas necesitan el momento de fluencia del elemento y su pendiente post-fluencia. La diferencia principal radica en que DRAIN-2DX no delimita el momento último que resiste el elemento, mientras que en MIDAS Gen se puede plantear dicho momento. De esta manera, MIDAS Gen determina el punto de quiebre de la curva de capacidad del sistema global y, con ello, el punto último del análisis donde la estructura se vuelve inestable.

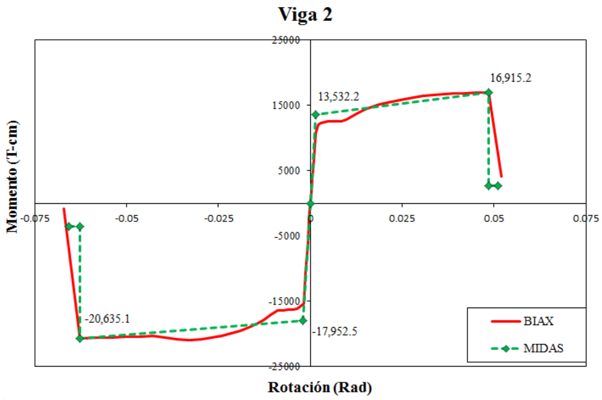


Figura 8 Idealización del diagrama momento-rotación para viga

Para los diagramas de momento-rotación; en DRAIN-2DX, se hacen idealizaciones entre los puntos de la falla balanceada y los de compresión axial pura y momento en ausencia de carga axial (línea roja). Por otro lado, en MIDAS Gen se permite la introducción de un mayor número de datos del diagrama de interacción, obteniendo un suavizado del diagrama que se asemeja con mayor precisión al del calculado con BIAX (Figura 9).

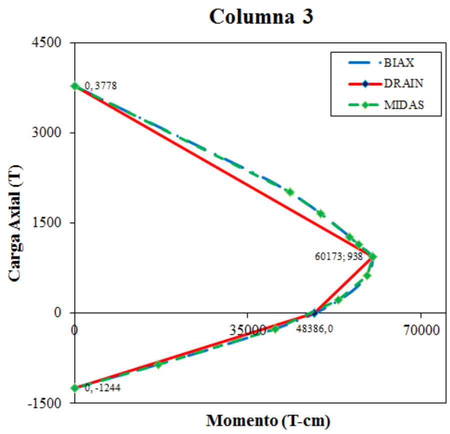


Figura 9 Diagrama de interacción momento-carga axial para columna

3. ANÁLISIS ESTÁTICOS NO LINEALES

Con base en análisis estáticos no lineales bajo cargas laterales monótonas crecientes, efectuados con el programa DRAIN-2DX y MIDAS Gen, se presentan resultados característicos para los diversos modelos evaluados. Se presentan comparativas entre mapeo de fluencias y curvas de cortante basal normalizado vs distorsión global de azotea. Además, se reportan en tablas las diferencias en los parámetros sísmicos de diseño obtenidas a partir de las curvas mencionadas con los diferentes parámetros de modelado tomados en cuenta.

3.1 Marcos planos de cinco niveles

Con el objetivo de evaluar las distintas formas de modelado de los disipadores en MIDAS Gen y de observar la posible divergencia de resultados ocasionado por el punto de inserción de las vigas, se evalúan en primera instancia marcos planos de cinco niveles con las características de la Figura 1a. Para los modelos en MIDAS Gen donde se utilizaron elementos liga, éstos fueron del tipo elemento (M5LC y M5LT). En la Figura 10 se presentan las curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea; con línea sólida roja, se indican los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX; con líneas formadas por guiones, los obtenidos para marcos con disipadores modelados con elementos viga-columna (M5BC y M5BT); y con líneas formadas por guiones y puntos, los calculados para marcos con disipadores modelados con elementos liga.

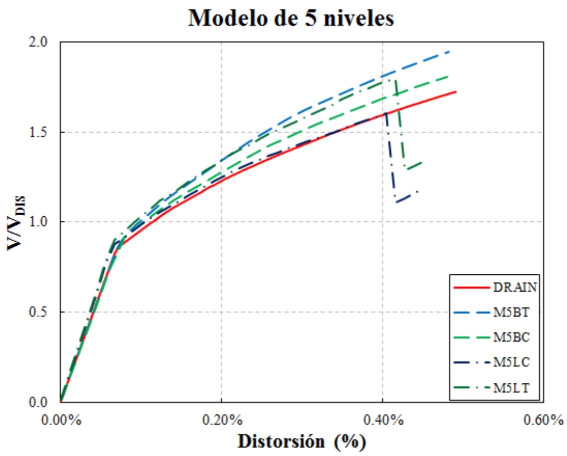
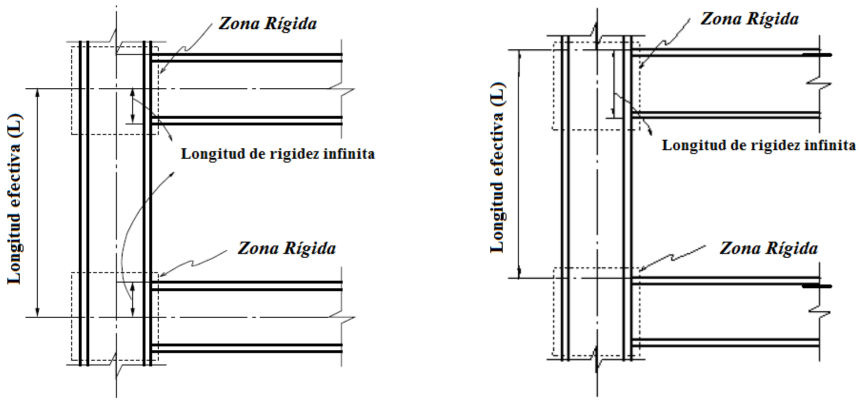


Figura 10 Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea con α=0.25, β=0.50

De los resultados mostrados en la Figura 10, y como era de esperarse, se aprecia que el modelar a los disipadores con elementos viga-columna en MIDAS Gen hace que la rigidez elástica del modelo global coincida exactamente con los resultados obtenidos por el DRAIN 2DX puesto que se empleó el mismo principio de modelado para los disipadores entre ambos programas. Sin embargo, se observa una variación perceptible en el intervalo no lineal, sobre todo, si se evalúa el cambiar el punto de inserción de las vigas en MIDAS Gen, obteniendo mayor magnitud de sobrerresistencia cuando se modela a la viga para que coincida con la altura de entrepiso (M5BT y M5LT), sin importar el tipo de elemento que se utilice para modelar a los disipadores. Por otro lado, modelar a los disipadores con elementos liga en MIDAS Gen, hace ligeramente más rígida a la estructura global, debido a que no se modela la rotación que experimenta el disipador con respecto al contraviento de soporte.

Las diferencias en los resultados debido al cambio en el punto de inserción de las vigas, tienen su fundamento en la forma de modelar las zonas rígidas en MIDAS Gen. La longitud de rigidez infinita en las columnas varía según el punto de inserción, es decir, existen diferencias si hace coincidir el nivel de entrepiso con la parte superior de la viga o con el centroide geométrico de ésta (Figura 11a). Cuando se toma en cuenta la primera suposición, la magnitud de la longitud de

rigidez infinita se calcula en el extremo superior de la columna (Figura 11b). Si se toma en cuenta la segunda hipótesis, la longitud de rigidez infinita se calcula para ambos extremos de la misma. Además, al variar dicho punto de inserción, se modifica en automático la rigidez del elemento y la distribución de carga, es decir, se crea una pequeña excentricidad, lo que genera fuerzas cortantes y momentos flexionantes adicionales. Esta variación no afecta en el cálculo de deformaciones axiales o torsionales (Midas 2014).



a) *offset*: centro-centro b) *offset*: centro-superior

Figura 11 Modelado de zonas rígidas en Midas Gen (adaptado de Midas 2014)

Evaluando los parámetros sísmicos de ductilidad (*Q*) y sobrerresistencia (*R*) reportados en la Tabla 2, los cuales se obtuvieron a partir de cada una de las curvas mostradas en la Figura 10, se comparan los diferentes resultados para cada programa en cuestión. Se aprecia que el modelar los disipadores bajo las mismas características entre los dos programas (elementos viga-columna), las diferencias no son mayores al 7% (sombreados en gris). Inclusive, para los modelos donde se presentaba una diferencia en la rigidez elástica por modelar a los disipadores de energía con elementos liga, las discrepancias de resultados no fueron mayores al 8%. El modelo que presentó mayor variación con respecto a los otros fue el M5BT modelado en MIDAS Gen. El uso de elementos viga-columna, aunado con alinear la viga con la altura de entrepiso, permitió al modelo desarrollar un mayor nivel de sobrerresistencia de más del 14%, comparándolo con el modelo elaborado en el DRAIN-2DX.

Tabla 2 Comparativa de resultados entre DRAIN-2DX y MIDAS Gen, marcos planos cinco niveles

PROGRAMA	***MODELOS***	***RESULTADOS***			***% PORCENTAJES***		
		Q	R	T (s)	*Q*	R	T(s)
DRAIN-2DX	M5BC	5.89	1.73	0.634			
MIDAS	M5BT	5.62	1.97	0.632	95.3%	114.1%	99.7%
	M5BC	5.62	1.83	0.633	95.3%	106.2%	99.8%
	M5LT	5.48	1.80	0.591	92.9%	103.9%	93.2%
	M5LC	5.55	1.61	0.598	94.1%	92.9%	94.3%

3.2 Marcos planos de 20 niveles

Con base en los resultados evaluados para los modelos descritos de los marcos planos de cinco niveles, se calibró el modelo de 20 niveles con balances de rigidez α=0.25 y β=0.50 representativo de la Figura 1b. Se decidió utilizar dicho modelo debido a que cuenta con un periodo cercano a 2 segundos (T=2.0 s), con lo que estaría cercano al periodo dominante de la zona para el cual fue diseñado (zona lacustre de la Ciudad de México), y de esta manera, aprovechar el mismo para los análisis dinámicos paso a paso y hacer la comparativa de los ciclos de histéresis de los disipadores obtenidos con DRAIN-2DX y MIDAS Gen, que se presentan y discuten más adelante.

En la Figura 12 se grafican las curvas de cortante basal normalizado vs distorsión global de azotea de los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX (línea continua) y los modelados con MIDAS Gen (línea discontinua). Se aprecia de ésta, que existen diferencias en la rigidez elástica de las curvas, directamente relacionada por la forma de modelar a los disipadores de energía. Para la figura antes mencionada, los modelos realizados en MIDAS Gen se usaron elementos liga para simular la participación de los disipadores dado que, como se aprecia de la Tabla 2, las discrepancias de resultados no afectarían de manera práctica en la obtención de parámetros sísmicos de diseño. Como se observa de la Tabla 3, las mayores diferencias se presentan en la obtención del parámetro *Q* cuando se usa como punto de inserción de la viga el centroide geométrico de la misma. Por otra parte, cuando se alinea la viga con la altura de entrepiso la mayor diferencia se presenta al obtener el parámetro *R*.

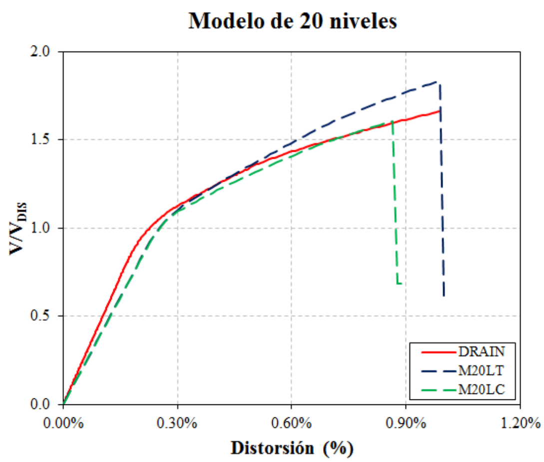
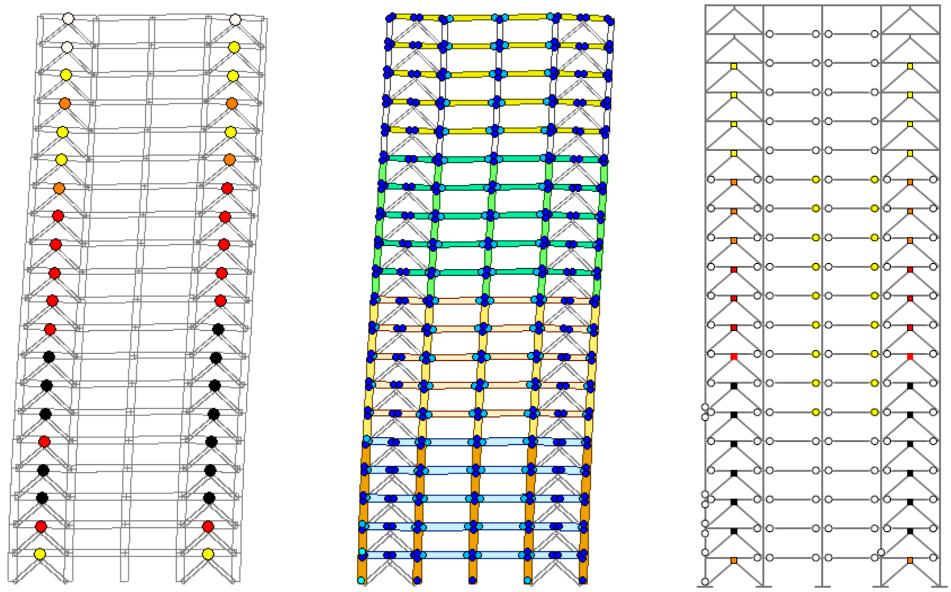


Figura 12 Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea con β=0.50, α=0.25

Tabla 3 Comparativa de resultados entre DRAIN-2DX y MIDAS Gen, marco plano de 20 niveles

PROGRAMA	*MODELOS*	*RESULTADOS OBTENIDOS* Q	R	T (s)	*% PORCENTAJES* *Q*	*R*	T
DRAIN-2DX	M20BC	3.95	1.66	1.992			
MIDAS	M20LC	3.29	1.61	1.866	83.3%	96.6%	93.7%
	M20LT	3.62	1.83	1.864	91.6%	110.3%	93.6%

En la Figura 13 se presenta el mapeo de fluencias inelásticas para el marco plano de 20 niveles obtenidas con MIDAS Gen y DRAIN 2DX. Comparando la magnitud de las ductilidades desarrolladas por los disipadores con MIDAS Gen (Figura 13a), contra las obtenidas de los resultados del DRAIN-2DX (Figura 13c), son bastante similares refiriéndonos al código de colores, con excepción de los primeros dos niveles del marco evaluado. Para el código de colores de las fluencias inelásticas en vigas y columnas, se aprecia que en ambos modelos tienen participación no lineal incipiente las columnas de la periferia izquierda. Por otra parte, apenas es perceptible el cambio de colores referentes a una participación no lineal mayor en vigas de los entrepisos intermedios, debido al código de colores utilizados en MIDAS Gen, donde el tono de azul más intenso representa una participación lineal elástica del elemento.



a) Disipadores en MIDAS Gen

b) Vigas y columnas en MIDAS Gen

c) Post-proceso de DRAIN 2DX

Figura 13 Mapeo de fluencias inelásticas para marco plano de 20 niveles con β=0.50, α=0.25

3.3 Marcos acoplados y modelos tridimensionales de cinco niveles

Evaluadas las diferencias de modelado en marcos planos entre MIDAS Gen y DRAIN-2DX, se realizaron modelos planos acoplados de cinco niveles para comparar sus resultados con el modelo tridimensional. Para el modelo en MIDAS Gen se utilizaron elementos liga para simular a los disipadores y se eligió la parte media superior como punto de inserción de las vigas. En DRAIN-2DX se modeló a la estructura en dos dimensiones, por lo que se tuvo que realizar dos modelos por separado para ver el efecto de los marcos acoplados en la dirección “*x*” (Figura 2), y en la dirección “*y*” (Figura 3). La ventaja que presenta MIDAS Gen es que se modela a la estructura en tres dimensiones en un único modelo, con lo que permite el análisis y la visualización de efectos ortogonales.

En la Figura 14 se presentan las curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para los modelos de cinco niveles antes mencionados. Se aprecia de ésta dos figuras, que corresponden a la dirección "*x*" y "*y*", respectivamente. En las curvas analizadas en la dirección "*x*", se aprecia además de los resultados del modelo tridimensional en MIDAS Gen y del modelo acoplado efectuado en DRAIN 2DX, una tercera curva con línea discontinua que representa la curva de capacidad con las mismas características geométricas y de resistencia pero con la configuración estructural representativa de la Figura 1a.

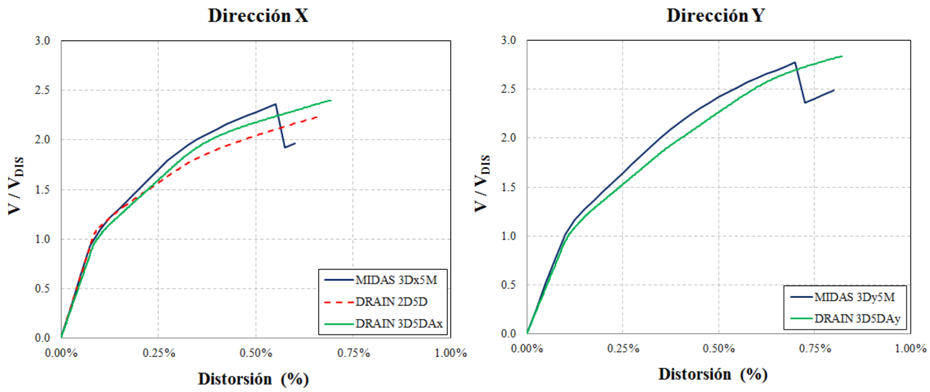


Figura 14 Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, modelo de cinco niveles

De los resultados expuestos en la Figura 14 para ambas direcciones, se observa que existen pequeñas diferencias en la rigidez de cada una de las curvas graficadas. Como se expuso con anterioridad, esto se debe al efecto del modelado de los disipadores y, para estos modelos en particular, principalmente a la rigidez de los nudos viga-columna en una modelación tridimensional rigurosa como la hecha en Midas (modelo 3Dx5M y 3Dy5M) con respecto a la hecha en marcos planos en el DRAIN-2DX. Además, se aprecia que la distorsión última que desarrolla el conjunto de marcos acoplados analizados en DRAIN-2DX es ligeramente mayor que los resultados evaluados en MIDAS Gen.

En las Tablas 4 y 5 se resumen las diferencias en la obtención de coeficientes sísmicos de diseño "*Q*" y "*R*" a partir de las curvas de capacidad de la Figura 14, y de los periodos de vibrar de los modelos obtenidos en cada uno de los programas. Se aprecia que la diferencia entre los valores es, para efectos prácticos, despreciables en ambas direcciones. Es decir, existe buena correlación entre el modelado en tres dimensiones y el modelado acoplado en dos direcciones. La mayor diferencia entre los resultados obtenidos se encuentra en la comparativa del coeficiente sísmico de ductilidad "*Q*". Se observa de la Tabla 4 que el modelar un solo marco con disipadores trae como resultado que la ductilidad global que desarrollaría la estructura sea mucho mayor en comparación que si se toman en cuenta en el modelado los demás marcos involucrados en la misma dirección, independientemente si se modela con una técnica de acoplamiento o en un modelo riguroso tridimensional.

Tabla 4 Comparativa de resultados de modelos en 2D y 3D, dirección *X*

PROGRAMA	***MODELOS***	***DIRECCIÓN X***			***% DIFERENCIAS***		
		Q	R	T (s)	*Q*	R	T (s)
MIDAS	3Dx5M	5.24	2.36	0.6361			
DRAIN-2DX	2D5D	5.71	2.23	0.6391	9.1%	5.5%	0.5%
	3D5DAx	5.09	2.40	0.6713	2.9%	1.8%	5.5%

Tabla 5 Comparativa de resultados de modelos en 2D y 3D, dirección *Y*

PROGRAMA	***MODELOS***	***DIRECCIÓN Y***			***% DIFERENCIAS***		
		Q	R	T (s)	*Q*	R	T (s)
MIDAS	3Dy5M	5.00	2.78	0.6935			
DRAIN-2DX	2D5D	-	-	-			
	3D5DAy	5.20	2.84	0.7303	4.1%	2.2%	5.3%

Las Figuras 15 a 22 corresponden al mapeo de fluencias inelásticas de todos los elementos involucrados en el sistema estructural. Como se ha observado en los mapeos para los marcos planos (Figura 13), los contravientos se mantienen elásticos durante todo el evento sísmico, dado que servirán de soporte a los disipadores y, por ende, éstos no pueden fallar en ningún momento. En la Figura 15 se observa de manera esquemática, el mapeo de rotaciones para el modelo efectuado en MIDAS Gen. Cabe señalar nuevamente que en las gráficas de MIDAS Gen los círculos en azul marino representan respuestas elásticas (Figuras 15, 17 y 21).

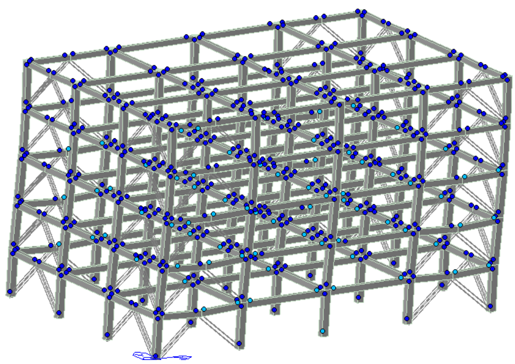


Figura 15 Mapeo de fluencias inelásticas de MIDAS Gen 3D para modelo de cinco niveles

Comparando las ductilidades de los disipadores obtenidas con MIDAS Gen en la dirección "*x*" (Figura 16) con las obtenidas de los resultados del DRAIN-2DX (Figuras 18 y 19), se aprecia una diferencia apenas perceptible en el disipador del cuarto entrepiso. Además, se observa que el patrón de formación de fluencias inelásticas en vigas y columnas son muy similares, y el código de color para todos los modelos es de un daño incipiente en vigas de los entrepisos uno al tres, y rotaciones en la base de las columnas interiores del primer nivel por efecto de la condición de apoyo como empotramiento perfecto.

De manera similar que para los mapeos en la dirección "*x*", para la dirección ortogonal a ésta, se aprecian leves diferencias en el código de colores asociado a la ductilidad desarrollada por los disipadores del entrepiso tres (Figuras 20 y 22). Por otra parte, la mayoría de las columnas presentaron comportamiento

elástico, con excepción de las columnas internas del primer entrepiso de los marcos sin disipadores (Figuras 21 y 22). Finalmente, las vigas de los dos últimos entrepisos en ambas direcciones de análisis, no presentaron comportamiento inelástico.

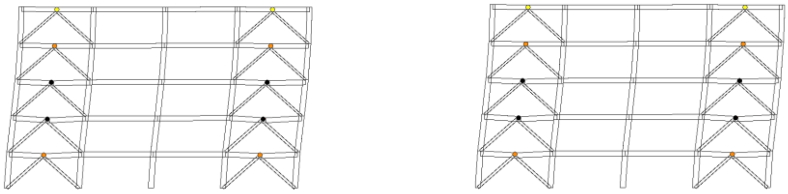


Figura 16 Mapeo de fluencia de disipadores en MIDAS Gen para modelo de cinco niveles, dirección *X*

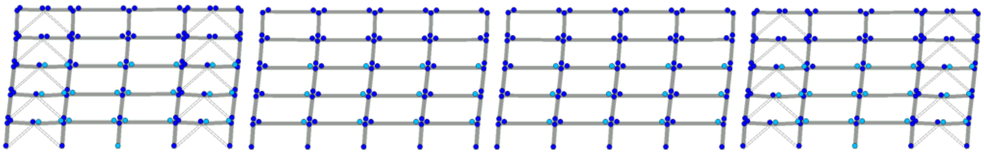


Figura 17 Mapeo de fluencias inelásticas MIDAS Gen para modelo de cinco niveles, dirección *X*

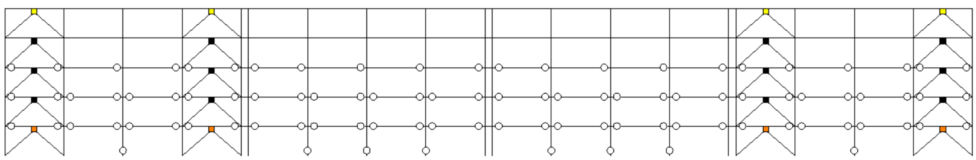


Figura 18 Mapeo de fluencias inelásticas DRAIN-2DX para modelo de cinco niveles, dirección *X*

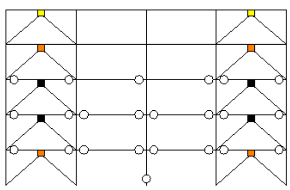


Figura 19 Mapeo de fluencias inelásticas DRAIN-2DX para modelo de cinco niveles sin acoplar, dirección *X*

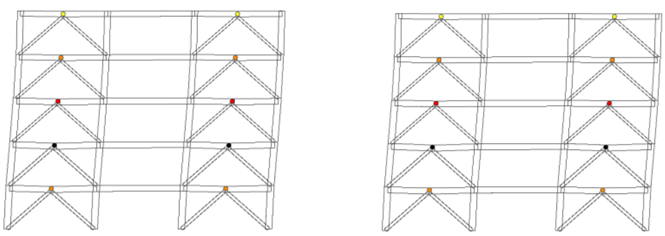


Figura 20 Mapeo de fluencia de disipadores MIDAS Gen para modelo de cinco niveles, dirección *Y*

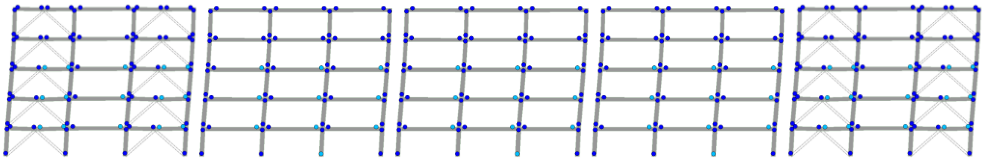


Figura 21 Mapeo de fluencias inelásticas MIDAS Gen para modelo de cinco niveles, dirección *Y*

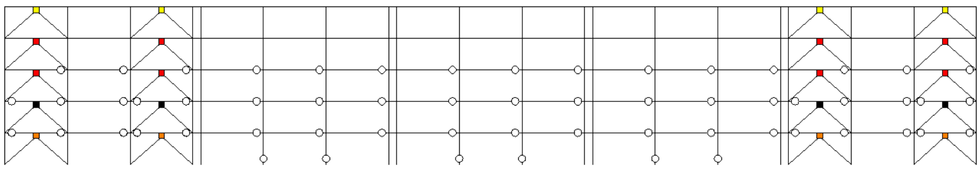


Figura 22 Mapeo de fluencias inelásticas DRAIN-2DX para modelo de cinco niveles, dirección *Y*

De manera general, se aprecia que la ductilidad del sistema global (*Q*) es similar para ambas direcciones evaluadas ($Q \approx 5$), para los modelos acoplados y tridimensionales. Por otra parte, existen mayores diferencias en los valores de sobrerresistencia obtenidos, y se aprecia que el valor de "*R*" es menor en la dirección "*x*" que en la dirección "*y*", debido a que en ésta última se cuenta con mayor número de crujías que influyen en una mejor distribución de la resistencia en los elementos involucrados.

4. ANÁLISIS DINÁMICOS PASO A PASO

4.1 Filtrado de señales

Con el objetivo de evaluar la participación de los disipadores en un análisis dinámico paso a paso con el programa DRAIN-2DX y compararlo con el programa MIDAS Gen, se procedió como primer paso a realizar un filtrado y corrección de todos los registros de aceleración utilizados en los modelos evaluados. El proceso de filtrado y corrección se realizó conforme lo descrito en Gómez *et al.* (2005), donde se establece lo siguiente:

1. Corrección de línea base del registro en aceleración, por posibles errores de medición (corrección de línea base).
2. Filtrado de la señal en aceleración. Se usó un filtro pasa banda con una frecuencia corte pasa-alta de 0.05 Hz y una frecuencia de corte pasa-baja de 30 Hz.
3. Integración del registro en aceleraciones ya corregido por línea base y filtrado, para obtener la historia del registro en velocidad.
4. Corrección de la línea base del registro en velocidad por errores en el proceso numérico de integración.
5. Integración del registro corregido en velocidad (por línea base) para obtener el registro en desplazamiento

En la Figura 23 se presenta de manera esquemática las diferencias de emplear la corrección del registro de aceleración bajo las pautas antes descritas y

lo que sucedería si se hiciera caso omiso de ellas. Se aprecia perfectamente que el solo filtrar la señal no es suficiente, pero no aplicar la metodología completa antes expuesta puede acarrear errores al momento de procesar los resultados de los análisis dinámicos paso a paso. Por ejemplo, puede ocasionar incrementos crecientes y poco reales en velocidades y aceleraciones, mientras que un filtrado excesivo eliminaría información importante del sismo (Gómez *et al.* 2005).

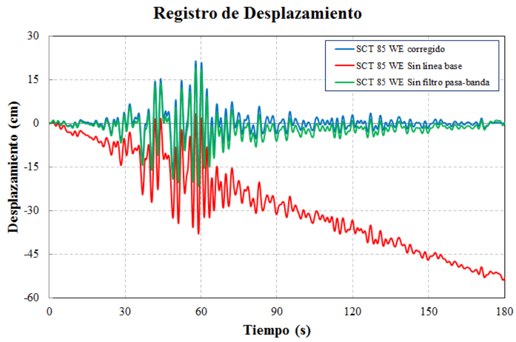
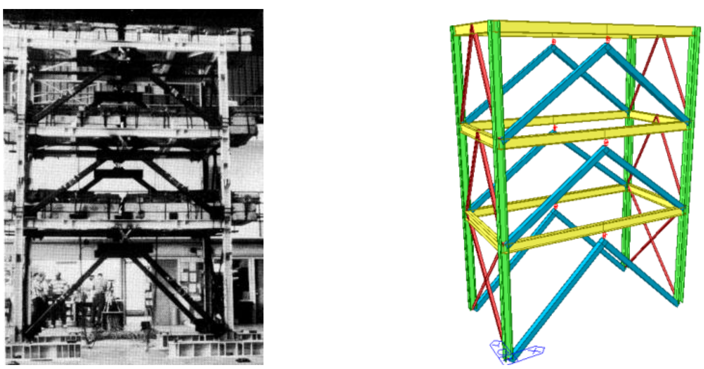


Figura 23 Registro de desplazamiento obtenido a partir del registro de aceleración de SCT-85, WE

4.2 Modelo Berkeley

Con la finalidad de realizar y evaluar modelos más complejos que representen las condiciones geométricas, de resistencia y las propiedades dinámicas de modelos reales, se han calibrado los resultados de modelos experimentales con los obtenidos a partir de análisis dinámicos paso a paso creados en MIDAS Gen. Se comparan los resultados presentados por Whittaker *et al*. (1989), obtenidos a partir de pruebas experimentales de un modelo de tres niveles con disipadores de energía tipo ADAS, sujeto al registro de aceleración “El Centro–33” con dirección norte-sur, ensayado en la universidad de Berkeley en 1988 (Figura 24a).



a) Modelo experimental (Whittaker *et al.* 1989) b) Modelo analítico MIDAS Gen

Figura 24 Modelo de Berkeley con disipadores tipo ADAS

Se realizaron dos modelos analíticos comparativos en MIDAS Gen representativos de la Figura 24b. Éstos se realizaron en tres dimensiones con la configuración geométrica y los pesos de entrepisos reportados por Whittaker *et al.*

(1989). Los elementos de vigas y columnas fueron modelados con elementos viga-columna, los contravientos con elementos que trabajan exclusivamente a carga axial y los disipadores con elementos liga del tipo fuerza. La diferencia entre los dos modelos evaluados se establece en las propiedades que se dieron de alta para los disipadores de energía. Para el modelo denominado "MOD_EXP", se utilizaron las propiedades de rigidez y de resistencia de los disipadores reportados en el modelo experimental; para el modelo denominado "MOD_Tena", se usó la formulación matemática para los disipadores tipo ADAS propuesta por Tena-Colunga (1997). Es importante mencionar que en éste último ("MOD_Tena"), se consideró un modelo numérico acoplado del disipador, es decir, se consideró la interacción de la rigidez de cada una de las direcciones tomadas en cuenta. Caso contrario del modelo "MOD_Exp", donde se consideró un modelo desacoplado del disipador, dado que únicamente se contaba con datos relativos de rigidez y de resistencia de la dirección principal donde trabajaban.

En la tabla 6 se resumen los periodos de vibrar de los modelos evaluados en esta sección; se aprecia de ésta que existe una mejor correlación del primer modo de vibrar para el modelo analítico que tomó en cuenta directamente los datos experimentales, aunque para el segundo modo existen diferencias mayores para ambos modelos analíticos. En las Figuras 25 y 26 se presentan las gráficas de desplazamientos máximos y de distorsiones respectivamente, suscitados por la excitación del registro de aceleración "El Centro-33". Se aprecia de la Figura 25 que con la formulación matemática propuesta por Tena-Colunga (1997), se obtiene una buena correlación entre los desplazamientos obtenidos con el modelo matemático y los resultados experimentales. Sin embargo, se observa de la Figura 26 que los resultados de los modelos analíticos, comparándolos con lo reportado por Whittaker *et al.* (1989), presentan una diferencia notoria en la forma del perfil de distorsiones; no obstante, para fines prácticos los valores numéricos son muy similares entre sí.

Tabla 6 Comparativa de periodos de vibrar de Modelos Berkeley

Modelo	T_1	T_2	T_1 ***Error (%)***	T_2 ***Error (%)***
Experimental	0.47	0.17		
MOD_EXP	0.4694	0.2343	0.13%	37.82%
MOD_Tena	0.4131	0.2343	12.11%	37.82%

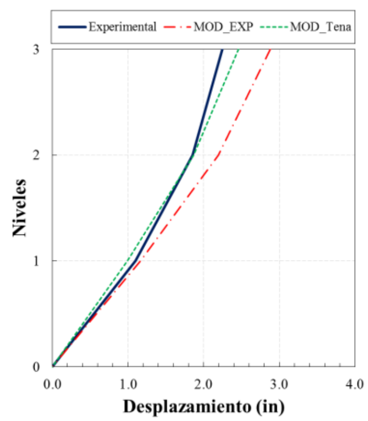


Figura 25 Desplazamientos máximos

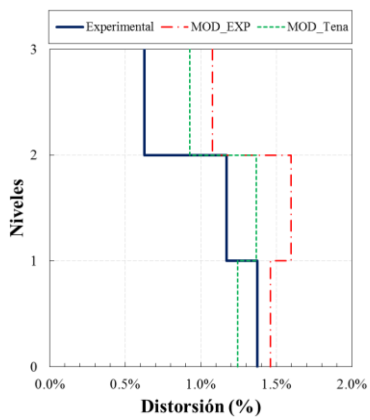


Figura 26 Distorsiones de entrepiso

 Vol.**22, 2** 135-162 (2017)

En la Figura 27 se aprecian los ciclos de histéresis de los disipadores, reportados en la prueba experimental, para cada nivel de entrepiso. Se aprecia de ésta que los dispositivos disipan mayor cantidad de energía en el primer nivel, es decir, el potencial de daño del sismo se distribuye sobre la altura del edificio. Además, pueden desarrollar desplazamientos máximos de hasta 10 veces su desplazamiento de fluencia de manera estable y sin degradación del elemento. En la Figura 28 se presentan los ciclos de histéresis desarrollados por los disipadores con la formulación matemática de Tena-Colunga (1997). Se observa que para cada uno de los ciclos de histéresis mostrados, existe buena correlación de resultados con pequeñas diferencias en la ductilidad última desarrollada por los disipadores, pero la forma del ciclo y la pendiente posterior a la fluencia son idénticas.

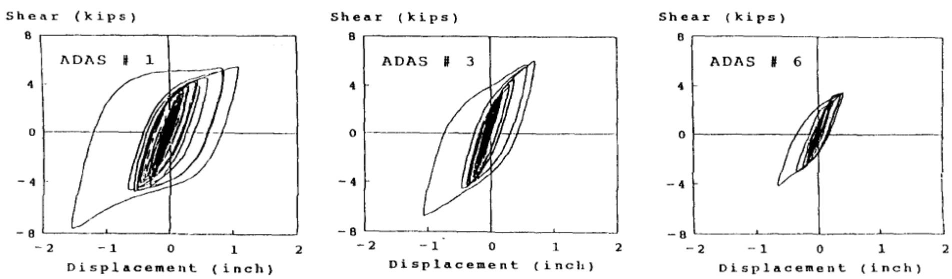


Figura 27 Ciclos de histéresis de los disipadores de prueba experimental (Whittaker et al. 1989)

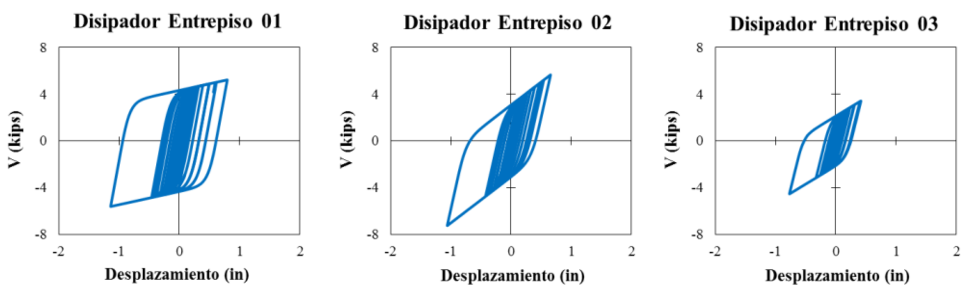


Figura 28 Ciclos de histéresis de los disipadores modelados acorde a Tena-Colunga (1997)

4.3 Marco plano de 20 niveles

Se realizó un análisis dinámico paso a paso al marco plano de 20 niveles, representativo de la Figura 1b, con balances de rigidez α=0.25 y β=0.50. Se comparan los ciclos de histéresis de los disipadores obtenidos con los programas DRAIN-2DX y MIDAS Gen. El modelo de 20 niveles se sometió a una excitación sísmica producida por el registro de SCT 1985 E-W, con lo que el periodo del modelo estaría cercano al periodo dominante del suelo T_s=2.0 s (zona lacustre de la Ciudad de México), para el cual fue diseñado dicho marco.

En la Figura 29 se presentan los ciclos de histéresis de los disipadores para cada entrepiso del modelo en cuestión. En el eje "*x*" se tienen las distorsiones como porcentajes y en el eje "*y*" el cociente del cortante actuante entre el cortante

Recibido: Octubre de 2016
Aceptado: Enero de 2017

con el cual se diseñaron los disipadores. Para cada una de las gráficas, se aprecia en color rojo los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX y en color azul los resultados obtenidos con el programa MIDAS Gen.

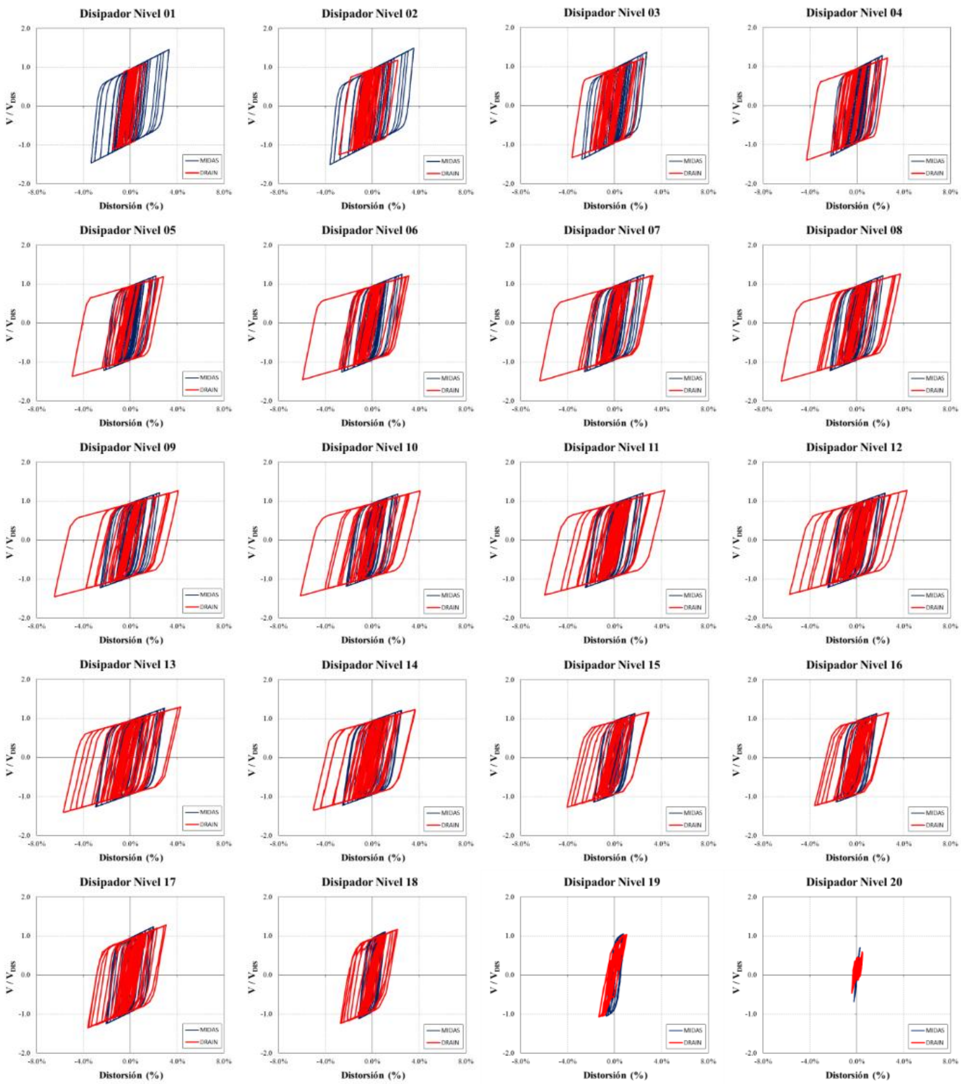


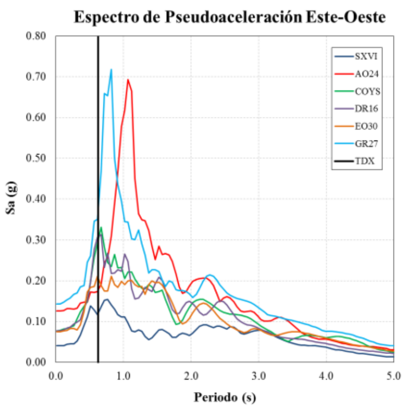
Figura 29 Ciclos de histéresis de los disipadores sujetos al registro de aceleración SCT-85 WE

Como se mencionó en párrafos anteriores, la forma de modelar a los disipadores histeréticos de energía entre ambos programas fue con distintos tipos de elementos. Esta primera diferencia en el modelado ocasiona un ligero cambio de rigidez de los disipadores, que se aprecia en la comparativa de los ciclos de histéresis de éstos para cada entrepiso en estudio (Figura 29). Este efecto ocasiona a su vez que la rigidez elástica del sistema completo sea diferente, tal como se aprecia en la curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea de la Figura 12. Comparando los periodos obtenidos por los dos programas, se aprecia que el periodo del marco con disipadores modelado con

MIDAS Gen es menor que aquél que se obtiene con DRAIN-2DX (Tabla 3), por lo que se comprueba que los disipadores modelados con DRAIN-2DX tienden a ser más flexibles, dado que incluyen la rotación del disipador y desarrollan más ciclos de histéresis y una ductilidad última mayor, sobre todo a partir del disipador referente al cuarto entrepiso, tal como se aprecia en la Figura 29.

4.4 Marcos acoplados y modelos tridimensionales de cinco niveles

Para los análisis dinámicos paso a paso del modelo acoplado y tridimensional de cinco niveles, se evaluaron distintos registros de aceleración sintéticos para la zona de transición de la Ciudad de México (Godínez 2005, Tena-Colunga *et al.* 2007), con el fin de hacer coincidir el periodo fundamental del modelo analítico con el periodo donde se presenta la máxima aceleración de los registros y, de esta manera, que los disipadores desarrollaran su máxima capacidad. Con los registros de aceleración corregidos y filtrados, se procedió a realizar los espectros de pseudoaceleración mostrados en la Figura 30, para las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur respectivamente. La línea en negro representa el periodo desarrollado por el modelo de cinco niveles con disipadores de energía para las direcciones correspondientes.



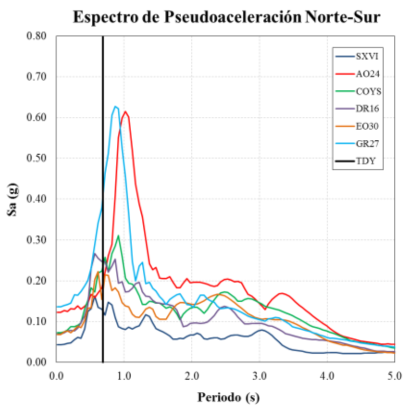


Figura 30 Espectros de pseudoaceleración para registros sintéticos de la zona de transición de la Ciudad de México generados por Godínez (2005)

Se decidió utilizar los registros de aceleración sintéticos AO24 y GR27 (Figura 31), dado que las ordenadas espectrales de ambas están cercanas al periodo dominante de los modelos analíticos a evaluar. A partir de estos registros de aceleración sintéticos se obtuvieron los ciclos de histéresis de los disipadores del modelo de marcos planos acoplados de cinco niveles en cada dirección de análisis, y de esta manera hacer la comparativa con el modelado riguroso tridimensional.

En las Figuras 32 y 33 se presentan los ciclos de histéresis desarrollados por los modelos de cinco niveles con disipadores de energía al inducirle el registro de aceleración sintético AO24. En color verde, se presentan los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX para los marcos acoplados; en color rojo, los resultados de un solo marco con disipadores representativo de la Figura 1a; y en color azul, los resultados que se obtuvieron con el programa MIDAS Gen.

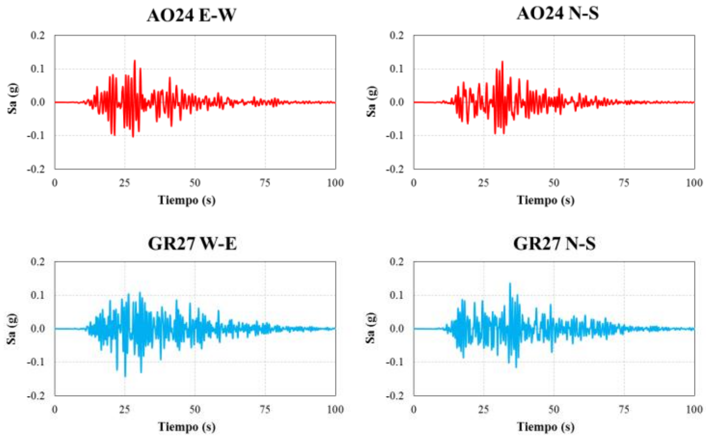


Figura 31 Registros sintéticos de aceleración generados por Godínez (2005)

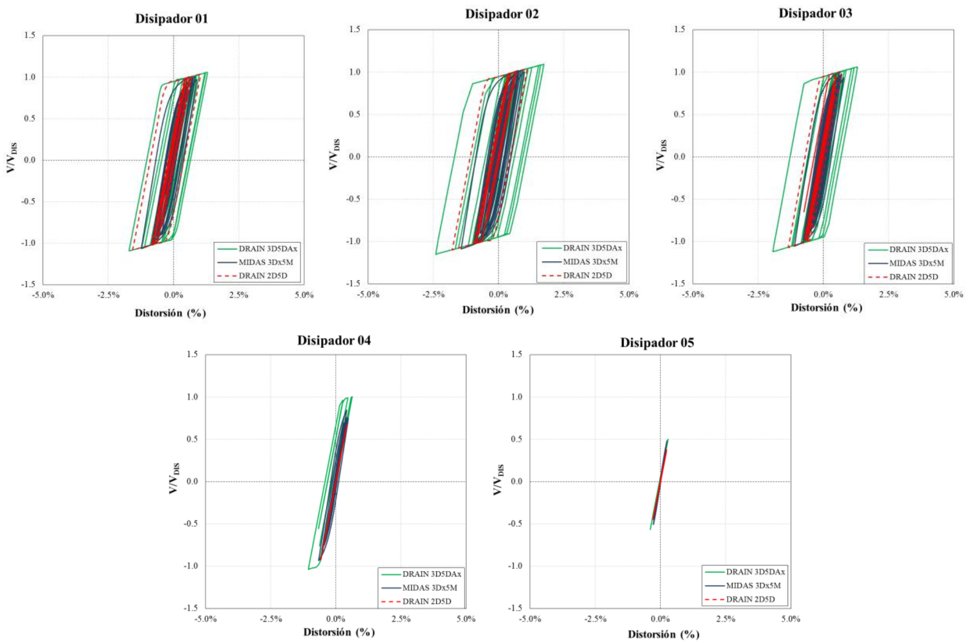


Figura 32 Ciclos de histéresis para el acelerograma AO24 de los disipadores de energía, dirección X

Comparando los resultados de los ciclos de histéresis desarrollados por los disipadores colocados en la dirección "*x*" (Figura 32), se aprecia que el hecho de considerar todos los marcos paralelos en la dirección de análisis permite que los disipadores desarrollen más ciclos de histéresis y una ductilidad última mayor, que comparándolo con el modelo donde se considera un sólo marco. Comparando los periodos dominantes en la dirección "*x*" de los modelos del marco plano y del modelo tridimensional (Tabla 4), se aprecia que éstos son similares y, por ende, los ciclos de histéresis para ambos modelos son parecidos entre sí en cada uno de los entrepisos evaluados (curvas en rojo y azul).

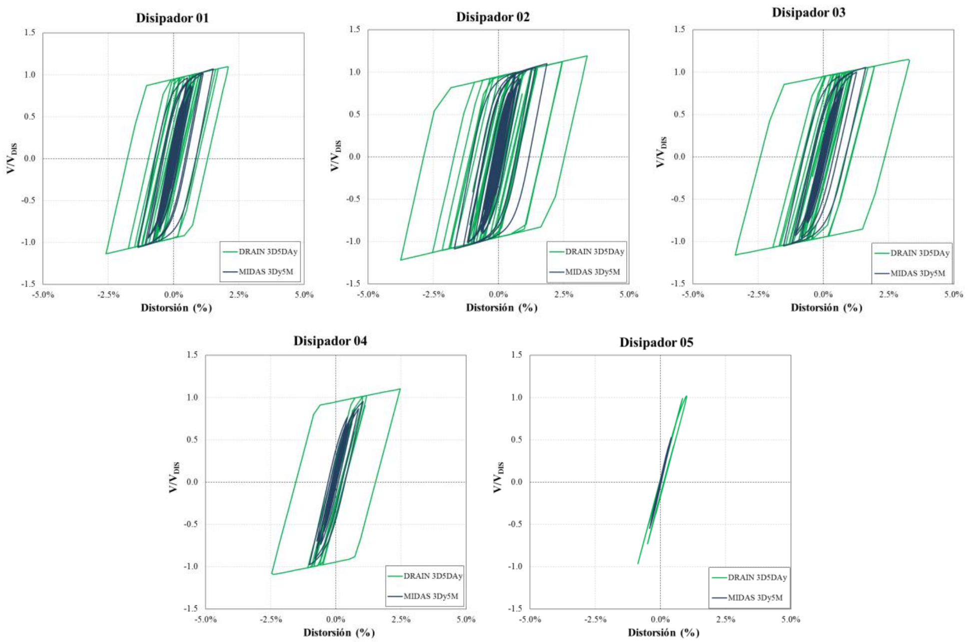


Figura 33 Ciclos de histéresis para el acelerograma AO24 de los disipadores de energía, dirección Y

Evaluando los ciclos de histéresis desarrollados por los disipadores en la dirección "*y*", obtenidos por MIDAS Gen (curvas azules) y DRAIN-2DX (curvas verdes), se presenta la misma tendencia que los resultados expuestos para los mismos modelos en la dirección "*x*". Se observa también que para los resultados obtenidos con el registro AO24, los disipadores desarrollan más ductilidad en la dirección "*y*" que en la dirección ortogonal a ésta.

5. CONCLUSIONES

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de estructuras de concreto reforzado con disipadores histeréticos de energía que asemejen, en mayor medida, las características de geometría y de resistencia de modelos reales, se realizaron modelos de marcos planos, marcos planos acoplados y modelos rigurosos tridimensionales con los programas DRAIN-2DX y MIDAS Gen.

En el programa DRAIN-2DX se modelaron los disipadores exclusivamente como un elemento tipo viga-columna idealizando propiedades de rigidez y de resistencia, dado que este es el modelado predilecto del segundo autor. Sin embargo, cabe señalar que se pueden usar en este programa otros modelados, entre ellas modelar también a los disipadores con un elemento tipo liga ("link"), identificado en su librería como "connection element". En MIDAS Gen, que es un programa más moderno que dispone de interfaces gráficas, se modelaron a los disipadores como elementos tipo liga ("*general link*") y también como elementos viga-columna, que a diferencia del elemento tipo liga, permite modelar la condición de apoyo que le dan los contravientos chevrón, permitiendo una rotación parcialmente restringida. Cuando se modela de esta manera en Midas Gen, los

resultados obtenidos entre Midas Gen y DRAIN-2DX son bastante similares entre sí, como es de esperarse, pues utilizan las mismas hipótesis.

Evaluando y comparando las curvas de cortante basal normalizado-distorsión global de azotea y los mapeos de fluencia inelástica, obtenidos de los análisis estáticos no lineales, se observa una buena correlación entre los resultados obtenidos con ambos programas. De manera práctica, los coeficientes para diseño sísmico relacionados a ductilidad y sobrerresistencia son similares con leves diferencias ocasionados, como se mencionó en el párrafo anterior, por la manera de modelar a los disipadores entre los programas. El detalle más relevante entre ambos programas es el hecho de que con MIDAS Gen, los análisis se detienen en automático cuando los elementos han llegado a su resistencia última, dado que se pueden definir diagramas momento-curvatura donde se precisa el punto y valor de la curvatura de falla; mientras que con DRAIN-2DX es necesario la revisión y el post-procesamiento de los datos obtenidos para evaluar el punto último donde los resultados aún son realistas, dado que los diagramas momento curvatura que se calculan internamente en el programa a partir de las curvas de interacción propuestas son idealizados a partir de la fluencia y, por ello, no se definen la curvatura asociada a la falla.

Comparando los ciclos de histéresis desarrollados por los disipadores de energía, a partir de diversos análisis dinámicos paso a paso, se observa que existen diferencias en la ductilidad última desarrollada por los disipadores. Esta diferencia se va acentuando conforme el modelo es más esbelto, pero sobre todo, está relacionado con la variación de los periodos obtenidos entre ambos programas.

Finalmente, se observó que el modelado de la estructura tomando en cuenta todos los marcos actuantes en la dirección de análisis (marcos acoplados), da como resultado una ductilidad global “*Q*” menor que si sólo se considera un marco de interés. Para el caso de los análisis dinámicos paso a paso, se observan diferencias en la distorsión alcanzada en los ciclos de histéresis desarrollados por los modelos analizados en MIDAS Gen y en DRAIN-2DX, obteniendo mayor capacidad de deformación con este último. Esto se debe principalmente a que en un modelado tridimensional riguroso, se presenta mayor rigidez de los nudos viga-columna (en Midas Gen), pues esa zona rígida se modela tridimensionalmente, con lo cual impacta de manera significativa la rigidez global de la estructura con respecto a la que puede hacerse en marcos planos (DRAIN-2DX), donde la zona rígida se modela en el plano conforme a la teoría general de elementos viga-columna (por ejemplo, Tena 2007).

6. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece la beca otorgada por CONACyT, que le permitió involucrarse en este proyecto de investigación la cual forma parte del desarrollo de su tesis doctoral. Además, los autores agradecen a la empresa Bowerbird Ingeniería por las facilidades de uso de la licencia académica de Midas Gen con el cuál se efectuaron los análisis del presente trabajo.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., Rodríguez M., y Mora D. (2016), "Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS", *Monografía CIMNE IS-75*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España, ISBN: 978-84-945077-5-5.
2. Chalco, D. M. (2014), "Análise sísmica de pórticos planos com Dissipadores metálicos de energia", *Master Thesis*, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, (Portugués).
3. Chen, Z., Ge, H., Kasai, A. y Usami, T. (2007), "Simplified seismic design approach for steel portal frame piers with hysteretic dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, pp. 541–562. http://dx.doi.org/10.1002/eqe.643
4. Christopoulos, C. y Filiautrault, A. (2006), *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*, first edition, IUSS Press, June. ISBN: 978-8873580379
5. De la Llera, J. C., Esguerra, C. y Almazán, J. L. (2004), "Earthquake behavior of structures with copper energy dissipators", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, pp. 329–358. http://dx.doi.org/10.1002/eqe.354
6. Godínez, E. A. (2005), "Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes en el Distrito Federal. El caso específico del sismo del 19 de septiembre de 1985", *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.
7. Gómez, C., Ordaz, M., y Tena, A. (2005), "Leyes de atenuación en desplazamiento y aceleración para el diseño sísmico de estructuras con aislamiento en la costa del pacífico", *Memorias, XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, México, DF, CDROM, Artículo No. II-02, pp. 1-18, septiembre.
8. Latour, M. y Rizzano, G. (2015), "Cyclic behavior and modeling of a dissipative connector for cross-laminated timber panel buildings", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 137-171. http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2014.948645
9. Midas (2014), *Integrated design systems for buildings and general structures*, Midas Gen v.2.1, Midas Information Technology Co. Ltd.
10. Nangullasmú, H. J. y Tena, A. (2015), "Importancia del confinamiento de elementos de concreto en la ductilidad de marcos con disipadores histeréticos de energía", *Memorias, XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, Guerrero, CDROM, Artículo VIII-02, pp. 1-19, noviembre.

11. NTCC-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.

12. Prakash V., Powell, G. H. y Fillipou, F. C. (1992), "DRAIN-2DX: base program user guide", *Report No. UBC/SEMM-92/29*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.

13. Ruiz, S. E. y Badillo, H. (2001), "Performance-based design approach for seismic rehabilitation of buildings with displacement-dependent dissipators", *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 3, pp. 531–548. http://dx.doi.org/10.1193/1.1586187

14. Tena-Colunga, A. (1997), "Mathematical modelling of the ADAS energy dissipation device", *Engineering Structures*, Vol. 19, pp. 811-821. http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00165-X

15. Tena, A. (2000), "Modelado analítico de edificios con disipadores de energía", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 62, pp. 29-62.

16. Tena A. (2007), *Análisis de estructuras con métodos matriciales*, primera edición, Limusa, septiembre. ISBN: 978-968-18-6980-9

17. Tena-Colunga, A., Godínez-Domínguez, E. A. y Pérez-Rocha, L. E. (2007), "Vulnerability maps for reinforced concrete structures for Mexico City's Metropolitan Area under a design earthquake scenario", *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 4, pp. 809-840. http://dx.doi.org/10.1193/1.2798243

18. Tena, A. y Nangullasmú, H. J. (2013), "Diseño sísmico de marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos. Definición de parámetros de diseño", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 13, No. 2, pp. 275-299.

19. Wallace, J. y Moehle, J. (1989), "BIAX: A computer program for the analysis reinforced concrete sections", *Report No. UCB/SEMM-89/12*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.

20. Whittaker, A., Bertero, V. V., Thompson, C. y Alonso, J. (1989), "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", *Report UCB/EERC-89/02*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.